



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 40 07 500 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁵:
G 01 B 11/24
G 01 B 11/02
G 01 C 11/04
G 06 F 15/66

⑳ Aktenzeichen: P 40 07 500.1
㉑ Anmeldetag: 9. 3. 90
㉒ Offenlegungstag: 12. 9. 91

DE 40 07 500 A 1

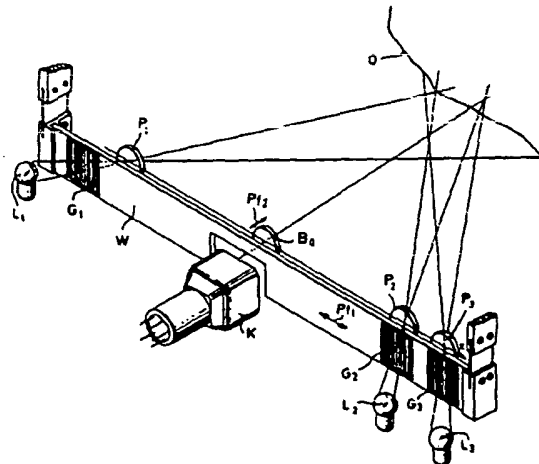
㉑ Anmelder:
Fa. Carl Zeiss, 7920 Heidenheim, DE

㉒ Erfinder:
Küchel, Michael, Dr., 7082 Oberkochen, DE; Hof,
Albrecht, Dr., 7080 Aalen, DE

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur berührungslosen Vermessung von Objektoberflächen

⑤7 Auf das zu vermessende Objekt (O) werden z. B. im Zeitmultiplexbetrieb nacheinander mehrere Streifenmuster projiziert und es werden die Phasen der vom Objekt verzerrten Streifenmuster an den Bildpunkten in einem der Kamera (K) nachgeschalteten Bildverarbeitungsrechner ermittelt.

Zur Vergrößerung des Meßbereichs in Richtung der Kameraachse (z) werden mindestens zwei Schwebungsfrequenzen mit sehr unterschiedlicher effektiver Wellenlänge ausgewertet, die dadurch erzeugt werden, daß z. B. die Streifenmuster von drei unter verschiedenen Winkeln (α_1 , α_2) zueinander geneigten Projektoren (P_1 , P_2 , P_3) projiziert werden.



DE 40 07 500 A 1



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 40 07 500 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁵:
G 01 B 11/24
G 01 B 11/02
G 01 C 11/04
G 06 F 15/66

②1 Aktenzeichen: P 40 07 500.1
②2 Anmeldetag: 9. 3. 90
④3 Offenlegungstag: 12. 9. 91

DE 40 07 500 A 1

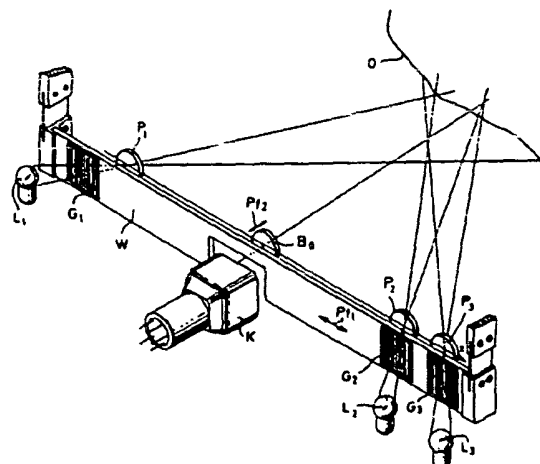
⑦1 Anmelder:
Fa. Carl Zeiss, 7920 Heidenheim, DE

⑦2 Erfinder:
Küchel, Michael, Dr., 7082 Oberkochen, DE; Hof,
Albrecht, Dr., 7080 Aalen, DE

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur berührungslosen Vermessung von Objektoberflächen

⑤7 Auf das zu vermessende Objekt (O) werden z. B. im Zeitmultiplexbetrieb nacheinander mehrere Streifenmuster projiziert und es werden die Phasen der vom Objekt verzerrten Streifenmuster an den Bildpunkten in einem der Kamera (K) nachgeschalteten Bildverarbeitungsrechner ermittelt.

Zur Vergrößerung des Meßbereichs in Richtung der Kameraachse (z) werden mindestens zwei Schwebungsfrequenzen mit sehr unterschiedlicher effektiver Wellenlänge ausgewertet, die dadurch erzeugt werden, daß z. B. die Streifenmuster von drei unter verschiedenen Winkeln (α_1 , α_2) zueinander geneigten Projektoren (P_1 , P_2 , P_3) projiziert werden.



DE 40 07 500 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur berührungslosen Vermessung von Objektoberflächen mit Hilfe von auf die Objektoberfläche projizierten Streifenmustern, die von einer Kamera detektiert und ausgewertet werden.

Es gibt bereits eine ganze Reihe verschiedener Verfahren, mit denen relativ große Bereiche einer Objektoberfläche bezüglich ihrer x-, y- und z-Koordinaten auf einmal vermessen werden, indem durch Projektion oder Schattenwurf eine regelmäßige, meist gitterförmige Struktur auf das Objekt aufbelichtet wird. Hierzu gehören die verschiedenen Varianten des unter dem Namen "Moiré-Topographie" bekannten Verfahrens, bei dem der infolge zweimaligen Lichtdurchganges durch ein Gitter gleicher Periode auftretende sogenannte Moiré-Effekt für die Gewinnung von Höheninformation der interessierenden Objektoberfläche ausgenutzt wird.

So wird beispielsweise in dem von Takasaki in Applied Optics 6 (1970), auf Seite 1467 beschriebenen "Schattenwurf"-Moiré-Verfahren die zu untersuchende Objektoberfläche durch ein davor gestelltes Amplitudengitter von einer möglichst punktförmigen Lichtquelle beleuchtet. Die derart strukturiert beleuchtete Oberfläche wird dann von einem Objektiv und zwar nochmals durch das gleiche Gitter hindurch, auf einen Schirm abgebildet, wobei die Beleuchtungsstrahlen und die Abbildungsstrahlen einen Winkel (α) einschließen. Da das auf die Objektoberfläche aufbelichtete Gitter entsprechend der Oberflächenform deformiert wird, entstehen aufgrund des Moiré-Effekts Konturlinien, die Information über die Tiefenausdehnung der Objektpunkte geben. Diese Konturlinien sind auch dann noch sichtbar, wenn die Grundfrequenz des zur Beleuchtung verwendeten Gitters selbst bei der Abbildung nicht mehr aufgelöst wird oder sogar gezielt "weggemittelt" wird, indem es während einer Aufnahme um eine oder mehrere volle Gitterperioden verschoben wird.

Eine weitere Variante der Moiré-Topographie-Verfahren ist das sogenannte Projektion-Moiré-Verfahren. Bei diesem Verfahren wird ein Gitter im Beleuchtungsstrahlengang eines Projektors auf die Objektoberfläche abgebildet und die Objektoberfläche durch ein Objektiv auf ein zweites Gitter vor der verwendeten Aufnahmekamera abgebildet. Ein derartiges ist z. B. in der EP-B1-01 21 353 beschrieben. Auch in dieser Verfahrensvariante ist es wieder möglich, die beiden Gitter, das Projektionsgitter und das zur Abbildung verwendete Gitter, synchron während einer Aufnahme zu verschieben, um Gitterunregelmäßigkeiten auszumitteln, ohne daß sich dabei die aufgrund des Moiré-Effektes entstehenden Konturlinien bzw. deren Lage im Raum ändert. Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Gitter die gleiche Gitterkonstante besitzen und die Brennweiten von Projektiv und Objektiv gleich sind. Aus der genannten Patentschrift ist es außerdem bekannt, symmetrisch zum Meßstrahlengang zwei Projektoren beidseitig unter gleichem Abstand und gleichem Projektionswinkel anzuordnen, um durch die beidseitige Projektion überlappende und aneinander anschließende Gittermuster zu erzeugen und damit das Problem von Abschattungen bei der Vermessung von stark gekrümmten Objektoberflächen auszuschalten.

In der dritten bekannten Variante von Moiré-Topographie-Verfahren wird auf ein zweites Gitter von der Aufnahmekamera verzichtet. Stattdessen übernimmt hier das Raster der Zeilen der Aufnahmekamera oder

die Pixelperiode einer CCD-Kamera die Funktion des Decodierungsgitters. Dieses sogenannte "Scanning"-Moiré-Verfahren ist beispielsweise in Applied Optics, Vol. 16, Nr. 8 (1977) auf Seite 2152 beschrieben.

Neben den beschriebenen Verfahren der Moiré-Topographie ist es auch bekannt, das Objekt zu vermessen, indem direkt die Höheninformation aus der Verformung des Streifenmusters auf der Objektoberfläche berechnet wird, ohne ein zweites Gitter vor der Kamera zu verwenden. Solche sogenannten "Streifenprojektionsverfahren" sind beispielsweise in der EP-A2-02 62 089, der US-PS 46 41 972, der US-PS 44 88 172 und der US-PS 44 99 492 beschrieben.

Sowohl bei den Moiré-Topographie-Verfahren als auch der Streifenprojektionsmethode ist es erforderlich, für die quantitative Auswertung der Streifenmuster bzw. Konturlinien zu Koordinatenmeßwerten die zyklische Helligkeitsvariation der Streifensysteme auf der Objektoberfläche zu messen. Dies wird im allgemeinen als Phasenmessung bezeichnet. Üblicherweise geht man hierbei so vor, daß die Lage des Projektionsgitters während einer Messung in mehreren Schritten um feste Beträge verschoben wird, die einer Phasenänderung von beispielsweise 90° oder 120° entsprechen.

Mit den bekannten Verfahren ist es jedoch nicht ohne weiteres möglich, größere Objekte aus dem Bereich der industriellen Fertigung ausreichend genau zu vermessen, insbesondere wenn diese Objekte Unstetigkeiten wie Kanten und Stufen aufweisen. Hierfür ist folgender Umstand verantwortlich:

Wegen der zentralperspektivischen Anordnung von Projektion und Beobachtung ist der Abstand aufeinanderfolgender Konturlinien nicht konstant sondern nimmt mit wachsender Tiefe des Objekts zu. Deshalb ist es ohne die Kenntnis des absoluten Abstandes der Objektoberfläche an mindestens einem Punkt auch nicht möglich, Aussagen über den Verlauf eines Profils einer stetigen Oberfläche zu gewinnen. Die gängigen Phasenmeßmethoden berechnen den Objektabstand jedoch nur Modulo 2π , d. h. sie liefern nur Relativwerte innerhalb einer Streifenordnungszahl. Mit diesen Phasenmethoden ist es deshalb auch nicht möglich, die infolge von Kanten und Stufen auftretenden Sprungstellen der auszuwertenden, zyklischen Funktion zu beseitigen.

Zur Lösung des Problems ist bereits vorgeschlagen worden, mehrere Streifenmuster mit stark voneinander abweichender Streifenperiode auf das Objekt zu projizieren und so mit Hilfe der längeren Streifenperiode den Bereich, in dem die Streifenphase eindeutig ist, zu vergrößern. Hierzu ist in der US-PS 44 88 172 ein zweiter Projektor vorgesehen, der ein zweites Streifenmuster mit achtfach längerer Periode projiziert. Für die Auswertung muß das zur Projektion benutzte Gitter jedoch mit einer gegenüber dem Gitter im anderen Projektor achtfach höherer Geschwindigkeit bewegt werden. Hierbei geht die feste räumliche Zuordnung der beiden Gitter zueinander verloren, die zur Projektion der Streifenmuster benutzt werden. Diese Zuordnung ist jedoch wichtig, wenn hochgenaue Messungen gemacht werden sollen.

In dem Gerät nach der EP-A2-02 62 089 hingegen werden die zwei verschiedenen Streifenmuster dadurch erzeugt, daß zwei Gitter gleicher Periode aufeinander gelegt und in unterschiedlichem Ausmaß gegeneinander verdreht werden, so daß die daraus resultierenden auf das Objekt projizierten Moiré-Streifenmuster stark voneinander abweichende Periodizitäten besitzen. Nachteilig hieran ist unter anderem, daß zur Erzeugung

der Streifenmuster unterschiedlicher Periode die Gitter mechanisch verstellt werden und es deshalb nicht möglich ist, die Streifenmuster im Videotakt schnell hintereinander zu projizieren.

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung der eingangs genannten Art zu schaffen, das eine eindeutige, absolute Abstandsmessung im gesamten Meßbereich gewährleistet und sich durch eine hohe Meßgenauigkeit sowie hohe Meßgeschwindigkeit auszeichnet.

Diese Aufgabe wird durch die im Kennzeichen des Anspruchs 1 angegebenen Maßnahmen gelöst.

Dadurch, daß mehrere Streifenmuster mit gleicher oder nur leicht voneinander abweichender Streifenperiode projiziert und die Schwebungsfrequenz zwischen den Streifenmustern ausgewertet wird, ist es möglich, die für die Projektion benutzten Gitter auch dann, wenn diese z. B. für die Phasennormung oder aus anderen Gründen bewegt werden, in einer festen räumlichen Zuordnung zu halten. Beispielsweise können alle Gitter auf einem gemeinsamen Träger aufgebracht werden. Dies kommt der Genauigkeit der Abstandsmessung zugute, da die Relativlage der Gitter zueinander von Umwelteinflüssen unbeeinflusst bleibt.

Zweckmäßig ist es, wenn die Streifenmuster bei der Aufnahme durch die Kamera z. B. durch Zeitmultiplexverfahren oder Projektion von farblich unterschiedlichen Mustern voneinander getrennt einem Bildverarbeitungsrechner zugeführt werden und dann die Schwebungsfrequenzen unterschiedlicher effektiver Wellenlänge erst im Rechner, nämlich aus den Differenzen der Streifenphase der Streifenmuster, gebildet werden. In diesem Falle überlagern sich die Intensitäten der projizierten Streifenmuster nicht, so daß die jeweils einem Gitter zugeordneten Streifen eindeutig identifiziert und einzeln ausgewertet werden können, d. h. ihre Phase exakt bestimmt werden kann.

Es ist vorteilhaft, drei Gitter gleicher Periode unter verschiedenen Winkeln auf das Objekt zu projizieren. Auf diese Weise lassen sich zwei Schwebungsfrequenzen mit sehr unterschiedlicher effektiver Wellenlänge aus den Phasendifferenzen je zwei projizierter Streifenmuster bilden, ohne daß Gitter mit unterschiedlicher Gitterkonstante benötigt werden. Vielmehr genügt es, einfach den Projektionswinkel zwischen zwei Gittern klein gegenüber dem Projektionswinkel zweier anderer Gitter zu halten. Die auszuwertenden Schwebungsfrequenzen besitzen dann effektive Wellenlängen, die im Verhältnis der Projektionswinkel zueinander stehen.

Gitter gleicher Periode lassen sich außerdem sehr einfach herstellen und beispielsweise in einem Fertigungsprozeß nebeneinander auf einem gemeinsamen Gitterträger aufbringen. Sie liegen zweckmäßig in der gleichen Ebene, so daß die zur Auswertung der Streifenmuster erforderlichen Rechenvorgänge vereinfacht sind.

Es ist jedoch auch möglich, die Schwebungsfrequenz mit der größeren Wellenlänge dadurch zu erzeugen, daß zwei Gitter mit nur leicht voneinander unterschiedlicher Periode projiziert werden. Zweckmäßig werden hierfür zwei Projektoren vorgesehen und mit jedem der beiden im Winkel zueinander angeordneten Projektoren jeweils die beiden Gitter mit leicht unterschiedlicher Periode farblich oder polarisationsoptisch getrennt projiziert. In diesem Falle kann auf die dritte Projektionsoptik verzichtet werden.

Nachfolgend werden vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung anhand der Fig. 1–5 näher erläut-

tert.

Fig. 1 ist eine Prinzipskizze, die den optisch-geometrischen Aufbau eines ersten Ausführungsbeispiels der Erfindung zeigt;

Fig. 2 ist eine perspektivische Darstellung der wesentlichen Bauteile der in Fig. 1 vereinfacht skizzierten Vorrichtung;

Fig. 3 ist eine Prinzipskizze eines zweiten, alternativen Ausführungsbeispiels;

Fig. 4 ist eine perspektivische Darstellung der wesentlichen Bauteile der in Fig. 3 vereinfacht skizzierten Vorrichtung;

Fig. 5a–b sind Teilschaltbilder des zur Signalauswertung der Vorrichtung nach Fig. 1 und 2 benutzten Auswerterechners.

In der schematischen Darstellung nach Fig. 1 ist ein Aufbau dargestellt, der im wesentlichen aus drei Projektoren mit den Projektionsoptiken (P_1), (P_2) und (P_3) und drei Gittern (G_1), (G_2) und (G_3) mit jeweils gleicher Gitterperiode besteht, die im Abstand (a) hinter den Projektionsoptiken (P_1 – P_3) angeordnet sind. Der Kamerasensor ist mit (K) bezeichnet und befindet sich mit dem vorgeschalteten Beobachtungsobjektiv (Bo) zwischen den Projektoren (P_1) und (P_2) im Abstand (a_k) hinter dem Beobachtungsobjektiv (Bo). Während die Projektoren (P_1) und (P_3) nun unter einem relativ großen Winkel (α_1) von ca. 30° zueinander geneigt sind, schließen die beiden nebeneinander angeordneten Projektoren (P_2) und (P_3) einen relativ kleinen Winkel (α_2) von beispielsweise $0,5^\circ$ ein. Durch diese Anordnung sind zwei Sätze von Ebenen konstanter Phasendifferenz definiert, nämlich die Phasendifferenzen der Streifenmuster der beiden Projektoren (P_1) und (P_2) oder (P_1) und (P_3) sowie die Phasendifferenzen der beiden Streifenmuster der Projektoren (P_2) und (P_3), wobei den beiden Sätzen unterschiedliche effektive Wellenlängen (λ_{eff}) in z-Richtung zugeordnet werden können. Die effektive Wellenlänge (λ_{eff}) wird durch die Gitterkonstante der Gitter (G_1), (G_2) und (G_3) und den Winkel (α_1) bzw. (α_2) zwischen den Projektionsachsen der jeweiligen Projektoren bestimmt und hängt, da die Gitterkonstanten der Gitter (G_1) bis (G_3) gleich sind, deshalb nur von den Winkeln (α_1) und (α_2) ab. Nachfolgend werden Formeln abgeleitet, aus denen sich die Objektkoordinaten (x), (y) und (z) aus den von den drei Projektoren (P_1), (P_2) und (P_3) projizierten Streifenmustern für die einzelnen Punkte der Objektoberfläche berechnen lassen. Hierfür ist vorausgesetzt, daß sich die Projektionszentren (Z_1), (Z_2) und (Z_3) der Projektionsobjektive auf einer sich in x-Richtung erstreckenden Geraden liegen und die drei Gitter (G_1) bis (G_3) im gleichen Abstand (a) hinter diesen Geraden angeordnet sind. Die Gitter sind beispielsweise wie in Fig. 4 skizziert auf einem gemeinsamen Träger (W) aus Glas oder einem Material mit geringem thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie z. B. Zerkon angeordnet und können gemeinsam relativ zur CCD-Kamera (K) in Richtung der Geraden x mit Hilfe einer Federwippe spielfrei bewegt werden. Die photoempfindliche Fläche der Kamera, d. h. der CCD-Sensor ist im Abstand (a_k) hinter dem Beobachtungsobjektiv (Bo) angeordnet.

Durch den beschriebenen Aufbau ist die Geometrie des Meßgeräts im wesentlichen bestimmt. Die z. B. an einem exemplarischen Punkt (x , $y=0$, z) projizierten Gitterorte (x_{p1} , x_{p2} , x_{p3}) werden mit der Videokamera (K), z. B. einer CCD-Kamera, beobachtet. Das Zentrum (x_{ok}) des Beobachtungsobjektivs (Bo) der Kamera legt den Ursprung des von den Projektoren (P_1) bis (P_3)

vorbestimmten Koordinatensystems fest.

Durch Betrachten ähnlicher Dreiecke erhält man für die Projektoren

$$\frac{x_{p1} - x_{op1}}{a} = \frac{x - x_{op1}}{z} \quad (1)$$

$$\frac{x_{p2} - x_{op2}}{a} = \frac{x - x_{op2}}{z} \quad (2)$$

$$\frac{x_{p3} - x_{op3}}{a} = \frac{x - x_{op3}}{z} \quad (3)$$

und für die Kamera

$$\frac{x_k}{a_k} = \frac{x}{z} \quad (4)$$

Die Kombination der Kameragleichung (4) mit den Projektionsgleichungen (1)–(3) liefert

$$z = \frac{x_{op1} \cdot a}{(n_1 + \delta_1) P + x_k \frac{a}{a_k}} \quad (5)$$

$$z = \frac{x_{op2} \cdot a}{(n_2 + \delta_2) P + x_k \frac{a}{a_k}} \quad (6)$$

$$z = \frac{x_{op3} \cdot a}{(n_3 + \delta_3) P + x_k \frac{a}{a_k}} \quad (7)$$

wobei die Differenzen ($x_{opi} - x_{pi}$, $i=1 \dots 3$) als das ($n_i + \delta_i$)-fache der Streifenperiode (P) mit (n_i) als einem Element der natürlichen Zahlen und ($\delta_i < 1$) ausgedrückt sind.

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen den Beobachtungen der Streifenmuster zweier Projektoren und bildet Differenzen, so erhält man aus (5), (6) und (7)

$$z = \frac{(x_{op1} - x_{op2}) \cdot a}{(n_1 - n_2 + \delta_1 - \delta_2) P} \quad (8)$$

$$z = \frac{(x_{op1} - x_{op3}) \cdot a}{(n_1 - n_3 + \delta_1 - \delta_3) P} \quad (9)$$

$$z = \frac{(x_{op2} - x_{op3}) \cdot a}{(n_2 - n_3 + \delta_2 - \delta_3) P} \quad (10)$$

oder

$$z = \frac{K_1}{N_1 - \Delta_1} \quad (11)$$

$$z = \frac{K_2}{N_2 - \Delta_2} \quad (12)$$

$$z = \frac{K_3}{N_3 - \Delta_3} \quad (13)$$

wobei K_1, K_2, K_3 Gerätekonstanten sind,

$$N_1 = n_1 - n_2, N_2 = n_1 - n_3, N_3 = n_2 - n_3 \text{ und} \\ \Delta_1 = \delta_1 - \delta_2, \Delta_2 = \delta_1 - \delta_3, \Delta_3 = \delta_2 - \delta_3 \text{ ist.}$$

Die Formeln (11), (12) und (13) beschreiben Ebenen konstanter Phasendifferenz ($N_i - \Delta_i$) zwischen je zwei Projektoren, die parallel zur x/y-Ebene liegen. Sie hängen nicht vom Beobachtungsort (x_k, y_k) auf der Kamera ab. Zur Messung müssen die ganzen Zahlen (N_1, N_2, N_3) und die Bruchteile ($\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$) bestimmt werden.

Den Flächen gleicher Phasendifferenz, die durch die Gleichungen (11), (12) und (13) beschrieben sind, lassen sich unterschiedliche effektive Wellenlängen (λ_{eff}) der Phasendifferenzen zuordnen. Für die aus einer Kombination der Projektoren (P_1) und (P_2) gewonnene Gleichung (11) und die aus einer Kombination der Projektoren (P_1) und (P_3) gewonnene Gleichung (12) liegen relativ kurze effektive Wellenlängen vor, während dem durch Gleichung (13) beschriebenen Fall der Kombination der beiden Projektoren (P_2) und (P_3) eine vergleichsweise große Wellenlänge (λ_{eff}) zugeordnet werden kann. Wesentlich ist, daß die verschiedenen effektiven Wellenlängen über die Winkel (α_1), (α_2) zwischen den Projektoren hochstabil eingestellt werden können.

Für die Auswertung der Messungen in einem Rechner bietet es sich an, die Formeln (11), (12) und (13) noch einmal umzuformulieren:

$$z = \frac{K_1}{\text{int} \left(\frac{K_1}{K_j} N_j + \frac{K_1}{K_j} \Delta_j - \Delta_1 \right) + \Delta_1} \quad (14)$$

$$z = \frac{K_2}{\text{int} \left(\frac{K_2}{K_j} N_j + \frac{K_2}{K_j} \Delta_j - \Delta_2 \right) + \Delta_2} \quad (15)$$

Zur vollständigen Bestimmung der Koordinaten (x), (y) und (z) eines Bildpunktes werden die Lateralkoordinaten (x) und (y) über das Abbildungsgesetz mit

$$x = \frac{x_k}{a_k} \cdot z \quad (16)$$

$$y = \frac{y_k}{a_k} \cdot z \quad (17)$$

berechnet.

Zur Auswertung werden die von den drei Projektoren (P_1) bis (P_3) in Zeitmultiplexbetrieb projizierten Streifenmuster der durch das Objektiv (Bo) von der Kamera (K) aufgenommen und getrennt in verschiedene Bildspeicher eingelesen. Die Berechnung der Objektkoordinaten (x), (y) und (z) nach den angegebenen Formeln geschieht dann wie nachstehend anhand von Fig. 5a und 5b beschrieben in einem hardwaremäßig aufgebauten Bildverarbeitungsrechner. Dieser Rechner verarbeitet die Bilddaten in Videoechtzeit. Er ist hierzu in Form einer Pipelinestruktur auch mit teilweise parallelen Datenpfaden aufgebaut und wird von einem Host-Rechner mit bekannter von Neumann-Struktur, d. h. beispielsweise einem kommerziell erhältlichen Prozeßrechner gesteuert. Für die weitere Beschreibung des Auswerterechners wird auf die Fig. 5a und 5b Bezug

genommen, in denen dieser im Blockschaltbild dargestellt ist.

Dort sind die drei unterschiedlichen Funktionsbaugruppen mit (A), (B) und (C) bezeichnet. Die Funktionsbaugruppe (A) stellt die Schnittstelle zu den externen Sensoren bzw. zu steuernden Teilen der Vorrichtung dar. Sie enthält einen Analog/Digitalwandler (12), der das Signal der Kamera (K) in Videoeichtzeit digitalisiert. Der Verstärkungsfaktor ist hierbei abhängig vom Ausgangssignal einer Photodiode (13) gesteuert, so daß das Videosignal an unterschiedliche Helligkeitsverhältnisse bzw. unterschiedliche Energien der als Blitzlampen ausgebildeten Lichtquellen (L_1 bis L_3) (siehe Fig. 3 und 4) angepaßt werden kann, die zur Beleuchtung der Gitter ($G_1 - G_3$) dienen. Zur Ansteuerung der Blitzlampen (L_1 bis L_3) enthält die Schnittstellenkarte (A) eine Triggerschaltung (31), die mit Kamera (K) synchronisiert ist. Die Schnittstellenkarte (A) enthält außerdem die Steuerelektronik (32) für den Motor, mit dem das Objektiv (Bo) der Kamera (K) auf unterschiedliche Objektbereiche, wie in Fig. 4 durch den Pfeil (Pf_2) angedeutet, scharf gestellt werden kann. Die Abfolge der Blitze und die Verstellung des Objektivs wird entsprechend einem festgelegten Meßprogramm des in der Fig. 5 nicht dargestellten konventionellen Host-Rechners gesteuert. Dies ist durch die beiden Pfeile "Host" symbolisiert, die auch an anderer Stelle in der Schaltung nach Fig. 5a und 5b auftauchen.

Das digitalisierte Videosignal, das den A/D-Wandler (12) verläßt, ist den Eingängen zweier parallel geschalteter Konvolutionsbausteine (14a) und (14b) in der Funktionsbaugruppe (B) zugeführt. Diese beiden Bausteine (14a) und (14b) führen eine Faltungsoption durch, um den Sinus bzw. Kosinus der Streifenphase an den einzelnen Bildpunkten aus dem Intensitätsverlauf des Signals in der näheren Umgebung der Bildpunkte zu bestimmen. Entsprechende Algorithmen sind beispielsweise im "Optical Engineering", Vol. 23, No. 4 (Juli/August 1984) auf Seite 391 - 395 beschrieben. Die Ausgänge der Bausteine (14a) und (14b) sind einer Schaltung (15) zugeführt, in der die Streifenphase aus dem Sinus und dem Kosinus berechnet wird. Hierzu ist in einer der Schaltung (15) zugeordneten Tabelle die Funktion Arcustangens abgelegt. Gleichzeitig werden auf der Basis der in der Schaltung (15) berechneten Phasenwerte ungültige Meßwerte maskiert. Ungültige Meßwerte sind solche, die bei entweder zu hoher oder zu geringer Beleuchtungsintensität aufgenommen worden sind und deren Pegel deshalb über oder unter einem vorbestimmten Grenzwert liegt. Die Maske, die diese Bildbereiche maskiert, wird in einem parallel zum Meßdatenstrom in dem mit (C) bezeichneten Schaltungsteil erzeugt, wie nachfolgend noch beschrieben werden wird.

Der Ausgang der Schaltung (15) ist über eine Berechnungsstufe (16) (arithmetic logic unit) drei parallel geschalteten Bildspeichern (17a-c) zugeführt. Dort werden die in der Schaltung (15) berechneten Streifenphasen (δ_1), (δ_2) und (δ_3) der von den drei Projektoren (P_1), (P_2) und (P_3) im Zeitmultiplexbetrieb nacheinander projizierten Streifenmuster zwischengespeichert. In drei weiteren Bildspeichern (18a), (18b) und (18c) sind Korrekturwerte abgelegt, die in einem Kalibrierverfahren gewonnen wurden und die von der Unvollkommenheit des geometrisch-optischen Aufbaus der Vorrichtung herrührenden Verzerrungen der Streifenphase der durch die drei Projektoren projizierten Muster beschreiben. Diese Korrekturwerte werden in der Recheneinheit (16) von den Streifenphasen (δ_1), (δ_2) und

(δ_3) subtrahiert. Die so korrigierten Phasenwerte gelangen wieder in die Bildspeicher (17a, b und c) und werden danach in einer zweiten Recheneinheit (19) weiterverarbeitet, die die Differenzen ($\Delta_1 = \delta_1 - \delta_2$) und ($\Delta_2 = \delta_1 - \delta_3$) berechnet. Diese Werte sind zur Berechnung des Objektstandes (z) nach den Formeln (11), (12) und (13) erforderlich. Dabei ist zu berücksichtigen, daß (Δ_3) sich als Differenz aus ($\Delta_2 - \Delta_1$) ergibt.

Auf die Recheneinheit (19) folgt eine Summationsstufe (S) (siehe Fig. 5b), die aus einer Recheneinheit (20) und zwei RAM-Speichern (21a) und (21b) besteht. In diesen Speichern (21a) und (21b) werden die Phasendifferenzen (Δ_1) und (Δ_2) für jeden Bildpunkt aufakkumuliert. Dies kann z. B. in einer Integer-Arithmetik so erfolgen, daß die 8 Bit Eingangswerte der die Phasendifferenzen (Δ_1) und (Δ_2) repräsentierenden Signale in einem Datenbereich von 16 Bit in den Speichern (22a) und (22b) aufsummiert werden. Auf diese Weise ist es möglich, die aus 255 Bildern gewonnenen Phasendifferenzen durch Summation zu mitteln und damit hinsichtlich der Genauigkeit der Phasenmessung zu verbessern.

Die Ausgänge der Bildspeicher (21a) und (21b) sind zwei darauffolgenden weiteren Recheneinheiten (22a) und (22b) zugeführt, in denen über weitere Tabellen (look-up-tables) die Formeln zur Berechnung des Objektstandes gemäß Gleichung (14) und (15) bereitgehalten sind. Diese Recheneinheiten (22a) und (22b) berechnen zwei Werte für den Objektstand (z), die in einer darauffolgenden Rechenstufe (23) nochmals gemittelt werden. In einem darauffolgenden digitalen Signalprozessor (24) werden die Koordinaten (x) und (y) der Bildpunkte gemäß Gleichung (16) und (17) aus den Meßwerten für (z) und den vom Host-Rechner gelieferten Gerätekonstanten (x_k), (y_k) und (a_k) berechnet und einer Ausgabeeinheit (25) zugeführt.

Mit der beschriebenen Methode wird die Höheninformation über das zu vermessende Objekt absolut gewonnen und nicht nur Module 2π der Streifenphase.

Das vorstehend beschriebene Auswerteverfahren setzt voraus, daß die von der Kamera (K) gelieferten Signale im linearen Bereich der Kamerakennlinie erzeugt werden, daß insbesondere keine Unter- oder Übersteuerung vorkommt. Weiterhin ist es für das beschriebene Verfahren erforderlich, daß innerhalb einer Aufnahmeserie der drei von den Projektoren (P_1), (P_2) und (P_3) projizierten Streifenmuster ein Phasenwert nur dann weiterverarbeitet wird, wenn die Phasenwerte in allen drei Bildern der Sequenz für den bestimmten Bildpunkt gültig sind. Diese Rechenoperationen werden im Schaltungsteil (C) von Fig. 5a durchgeführt. Ob ein Meßgerät gültig oder ungültig ist, wird in einem Bit des look-up-tables LUT in der Recheneinheit (15) abgefragt. Die "und" Verknüpfung über die drei Videobildsequenzen wird in der Rechenstufe (26) zusammen mit einem rekursiv geschalteten RAM-Baustein (27) erzeugt. In der anschließenden Rechenstufe (28) wird die Anzahl der gültigen Meßwerte an jedem Bildpunkt berechnet und in einem nachfolgenden RAM-Baustein (29) gespeichert. Unter der Anzahl der Meßwerte ist hierbei die Anzahl der Videobilder zu verstehen, über die die Phasendifferenzen im Summationsbaustein (S) von Fig. 5b aufsummiert werden. Setzt man eine geeignete gewählte Grenze, die eine Mindestanzahl von gültigen Messungen für jeden Bildpunkt beschreibt, dann werden all die Bildpunkte ausgeblendet, in denen die Anzahl der gültigen Messungen unterhalb dieser Grenzen liegt und alle übrigen Bildpunkte werden in die Ergebnisberechnung miteinbezogen. Die hierdurch beschriebene, über die

Bildpunkte gelegte Datenmaske ist durch das mit (30) bezeichnete Quadrat in Fig. 5a symbolisiert. Mit ihr kann der zur Ausgabe dienende Videomonitor (42) an den entsprechenden Bildpunktstellen dunkelgesteuert werden.

Der anhand von Fig. 5a und 5b beschriebene in Hardware realisierte Auswerterechner stellt eine Lösung dar, mit der die Signale der Kamera zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens verarbeitet werden können. Diese Lösung ist darauf zugeschnitten, daß die Streifenmuster durch die drei Projektoren (P_1), (P_2) und (P_3) im Zeitmultiplexbetrieb nacheinander projiziert und die Bilder dann von der Kamera (K) nacheinander aufgenommen und verarbeitet werden. Es ist jedoch auch möglich, die Streifenmuster beispielsweise in verschiedenen Farben gleichzeitig zu projizieren und mit drei über Farbteiler getrennte Kameras gleichzeitig aufzunehmen. Dann müssen allerdings der Eingangskanal, d. h. der A/D-Wandler (12), die Konvolutionsbausteine (14a) und (14b), die Recheneinheiten (15) und (16), die im Zeitmultiplexbetrieb arbeiten, in entsprechender Anzahl von drei Stück parallel ausgeführt werden. Dies hat zwar höhere Kosten zur Folge, bietet jedoch auch eine größere Bandbreite in der Verarbeitungsfrequenz. Umgekehrt sind die beschriebenen Rechenoperationen auch auf einem passend programmierten, geeignet leistungsfähigen, sequentiell arbeitendem Rechner herkömmlicher Struktur ablauffähig, allerdings dort nur mit erheblich längeren Laufzeiten, so daß eine Echtzeitverarbeitung der Videosignale in diesem Falle nicht zu erzielen ist.

Dadurch, daß bei dem beschriebenen Verfahren die z-Messung immer als Differenz zweier Projektionen, beispielsweise der Streifenmuster der Projektoren (P_1) und (P_2) oder der Projektoren (P_2) und (P_3) gebildet wird, kann der Träger (W) mit den Gittern (G_1) bis (G_3) (siehe Fig. 4) in Richtung des Pfeils (Pf_1) verschoben werden, ohne daß die bei der Signalauswertung erhaltenen z-Werte beeinflußt werden. Hierbei können nun mehrere Messungen mit verschiedenen Stellungen des Gitterträgers (W) gemacht werden, bei denen entsprechende auch unterschiedliche Bereiche der Gitter beleuchtet sind. Da die Einzelmessungen hinsichtlich der Phasendifferenzen (Δ_i) über alle Bilder aufaddiert und hierbei gemittelt werden, wirkt sich das so aus, daß statistische Fehler, herrührend entweder von Fertigungsunauigkeiten der Gitter oder herrührend durch die einmalige Anwendung des Auswertealgorithmus, mit \sqrt{N} verbessert werden, wenn N die Anzahl der Messungen ist.

Gleichzeitig kann die Beleuchtungsintensität von dem Wert Null bis zur Sättigung durchgesteuert werden, damit möglichst von allen Objektpunkten, deren Reflexionsvermögen ja durchaus unterschiedlich sein kann, brauchbare Meßwerte erhalten werden können. Die Maskierungselektronik in Teil (C) der Schaltung von Fig. 5a sorgt hierbei dafür, daß alle Messungen im nicht-linearen Bereich der Kamera (K) verworfen werden.

In den Fig. 3 und 4 ist ein zweites, alternatives Ausführungsbeispiel der Erfindung dargestellt. In Analogie zu Fig. 1 zeigt die Skizze des zweiten Ausführungsbeispiels in Fig. 3 den prinzipiellen Aufbau des Meßgeräts, der im wesentlichen aus zwei Projektionsoptiken (P_{11}) und (P_{12}) und vier Gittern (G_{11}/G_{13}) und (G_{12}/G_{14}) besteht. Der Kamerasensor ist wieder mit (K) bezeichnet und befindet sich mit dem vorgesetzten Beobachtungsobjektiv (Bo) zwischen den Projektoren (P_{11}) und (P_{12}). Im hier beschriebenen Falle enthält jeder der bei-

den Projektoren (P_{11}) und (P_{12}) zwei Gitter und die Gitterkonstanten bzw. Gitterperioden je zweier Gitter (G_{11}) und (G_{12}) sowie (G_{13}) und (G_{14}) sind paarweise gleich. Hingegen unterscheiden sich die Gitterkonstanten bzw. Perioden der Gitter (G_{11}) und (G_{13}) bzw. (G_{12}) und (G_{14}) innerhalb eines Projektors geringfügig. Beispielsweise besitzt das Gitter (G_{11}) eine Gitterkonstante von 25 Linienpaaren/mm und das Gitter (G_{13}) eine Gitterkonstante von 25,5 Linienpaaren/mm. Durch diese Anordnung lassen sich zwei geringfügig voneinander abweichende Sätze von Ebenen konstanter Phasendifferenz definieren, nämlich die Phasendifferenzen zwischen den paarweise nacheinander projizierten Gittern (G_{11}) und (G_{12}) und die Phasendifferenzen zwischen den paarweise nacheinander projizierten Gittern (G_{13}) und (G_{14}). Betrachtet man nun die Schwebungsfrequenz zwischen den beiden Sätzen von Ebenen konstanter Phasendifferenz, so läßt sich dieser eine effektive Wellenlänge

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

zuordnen, die sehr viel größer ist als die den Flächen gleicher Phasendifferenz zugeordneten effektiven Wellenlängen λ_1 bzw. λ_2 . Durch Auswerten dieser Schwebungsfrequenz läßt sich die Vieldeutigkeit der Phasennormierung beseitigen, die auftritt, wenn nur mit zwei Gittern (G_{11}) und (G_{12}) gleicher Periode gearbeitet wird.

Die Formeln, die zur Auswertung der Streifenmuster dienen, die mit diesem Aufbau erzeugt werden, lassen sich leicht aus den anhand von Fig. 1 abgeleiteten Formeln gewinnen, indem nämlich von Gleichung (8) ausgegangen wird und man diese Gleichung für die beiden Gitterpaare (G_{11}/G_{12}) und (G_{13}/G_{14}) mit den beiden unterschiedlichen Periodizitäten (P^1) und (P^2) aufschreibt. Man erhält

$$z = \frac{(x_{\text{op1}} - x_{\text{op2}}) \cdot a}{(n_1^1 - n_2^1 + \delta_1^1 - \delta_2^1) \cdot P^1} \quad (18)$$

$$z = \frac{(x_{\text{op1}} - x_{\text{op2}}) \cdot a}{(n_1^2 - n_2^2 + \delta_1^2 - \delta_2^2) \cdot P^2} \quad (19)$$

oder

$$z = \frac{K}{(N^1 + \Delta^1)P^1} \quad (20)$$

$$z = \frac{K}{(N^2 + \Delta^2)P^2} \quad (21)$$

wobei K eine Gerätekostante

und $N^1 = n_1^1 - n_2^1$, $N^2 = n_1^2 - n_2^2$
sowie $\Delta^1 = \delta_1^1 - \delta_2^1$ und $\Delta^2 = \delta_1^2 - \delta_2^2$ ist.

Hieraus ergibt sich

$$z = (N^2 - N^1 + \Delta^2 - \Delta^1) \frac{P^1 \cdot P^2}{P^1 - P^2} \quad (22)$$

Diese Gleichung (22) beschreibt eine Funktion mit einer im Vergleich zu Gleichung (20) bzw. (21) sehr viel

größerer effektiver Wellenlänge. Der Objektabstand z läßt sich hieraus in ganz ähnlicher Weise wie anhand von Fig. 5 beschrieben ermitteln, indem die Nachkomponenteile der Phasen

$$\delta_1^1, \delta_1^2, \delta_2^1, \delta_2^2$$

der durch die vier Gitter (G_{11}) bis (G_{14}) projizierten Streifenmuster gemessen und entsprechend der Gleichung (22) ausgewertet werden.

Wesentlich ist, daß die vier Streifenmuster getrennt projiziert werden, so daß auf der Oberfläche des Kamerasensors (K) immer nur ein definiertes Streifenmuster entsteht und ausgewertet werden kann, sich also nicht die Intensitäten unterschiedlicher Streifenmuster überlagern und die Auswertung stören. Hierzu sind wie in Fig. 4 dargestellt die beiden Gitter (G_{11}) und (G_{13}) hinter der Projektionsoptik (P_{11}) auf die Flächen eines ersten Strahlteilerwürfels (S_1) aufgesetzt und die beiden Gitter (G_{12}) und (G_{14}) hinter der Projektionsoptik (P_{12}) auf die Flächen eines zweiten Strahlteilerwürfels (S_2) aufgesetzt. Beleuchtet werden die Gitterpaare (G_{11}) und (G_{13}) von zwei verschiedenen Lichtquellen (L_{11}) und (L_{13}) durch Farbfilter (F_{11}) und (F_{13}) hindurch, so daß Streifenmuster in unterschiedlicher Farbe entstehen, die von einer Farbkamera (K) getrennt verarbeitet werden können. Die Trennung des Gitterpaares (G_{12} , G_{14}) erfolgt auf die gleiche Weise mit Farbfiltern (F_{12}) und (F_{14}), die von zwei Lampen (L_{12}) und (L_{14}) beleuchtet werden.

Alternativ zu der beschriebenen Farbcodierung ist es natürlich auch möglich, die vier Gitter nacheinander im Zeitmultiplex durch eine entsprechende Ansteuerung der Lampen (L_{11}) bis (L_{14}) zu projizieren oder die Trennung der Streifenmuster polarisationsoptisch vorzunehmen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Vermessung von Objektoberflächen mit Hilfe von auf die Oberfläche projizierten Streifenmustern, die von einer Kamera aufgenommen und ausgewertet werden, wobei zur Vergrößerung des Meßbereiches in Richtung der Kameraachse (z) Strukturen mit unterschiedlicher Periodizität ausgewertet werden, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Streifenmuster (G_1 , G_2 , G_3) gleicher oder leicht voneinander abweichender Periode projiziert werden und daß mindestens zwei aus den Streifenmustern gewonnene Schwebungsfrequenzen mit unterschiedlicher effektiver Wellenlänge für die Auswertung herangezogen werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Streifenmuster (G_1 , G_2 , G_3) bei der Aufnahme durch die Kamera voneinander getrennt einem Bildverarbeitungsrechner zugeführt werden, und daß die Schwebungsfrequenzen im Rechner erzeugt werden, indem die Differenzen (Δ_1 , Δ_2 , Δ_3) der Streifenphase (δ_1 , δ_2 , δ_3) der Streifensysteme gebildet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß drei Gitter (G_1 , G_2 , G_3) gleicher Periode unter verschiedenen Winkeln (α_1 , α_2) auf das Objekt projiziert werden.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die drei Gitter (G_1 , G_2 , G_3) in einer gemeinsamen Ebene angeordnet sind.
5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Streifenmuster durch zwei Paare

(G_{11}/G_{12} , G_{13}/G_{14}) von Gittern mit gleicher Periode projiziert werden, wobei die Perioden der Gitterpaare leicht unterschiedlich gewählt sind.

6. Vorrichtung zur Vermessung von Objektoberflächen mit mindestens zwei Projektoren, die ein Streifenmuster gleicher Periodizität auf das Objekt (O) projizieren und einer Kamera (K), von der ein Bild der Objektoberfläche aufgenommen wird und der ein Bildverarbeitungsrechner nachgeschaltet ist, der aus den Videosignalen der Kamera (K) die Höheninformation (z) für die einzelnen Punkte der Objektoberfläche gewinnt, dadurch gekennzeichnet, daß die Projektoren (P_2 , P_3) unter einem gegenseitigen Winkel zueinander angeordnet ist, der klein gegenüber dem Winkel ist, den sie mit der Achse der Kamera (K) einschließen.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens drei Projektoren (P_1 , P_2 , P_3) vorgesehen sind, die Streifenmuster gleicher Periode projizieren, und daß die zur Projektion dienenden Gitter (G_1 , G_2 , G_3) auf einem gemeinsamen Träger (W) bzw. Substrat aufgebracht sind.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger bzw. das Substrat relativ zur optischen Achse der Kamera (K) in der Ebene der Gitter (G_1 , G_2 , G_3) beweglich gelagert ist.

9. Vorrichtung zur Vermessung von Objektoberflächen mit mindestens zwei Projektoren, die ein Streifenmuster gleicher Periodizität auf das Objekt (O) projizieren und einer Kamera (K), von der ein Bild der Objektoberfläche aufgenommen wird und der ein Bildverarbeitungsrechner nachgeschaltet ist, der aus den Videosignalen der Kamera (K) die Höheninformation (z) für die einzelnen Punkte der Objektoberfläche gewinnt, dadurch gekennzeichnet, daß jeder der beiden Projektoren zwei Gitter (G_{11} , G_{13}/G_{12} , G_{14}) mit leicht unterschiedlicher Gitterperiode getrennt projiziert.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Projektoren Farbteiler (F_{11}/F_{12} , F_{13}/F_{14}) zur Trennung der Streifenmuster enthalten und die Kamera (K) als Farbkamera ausgebildet ist.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

— Leerseite —

Fig. 2

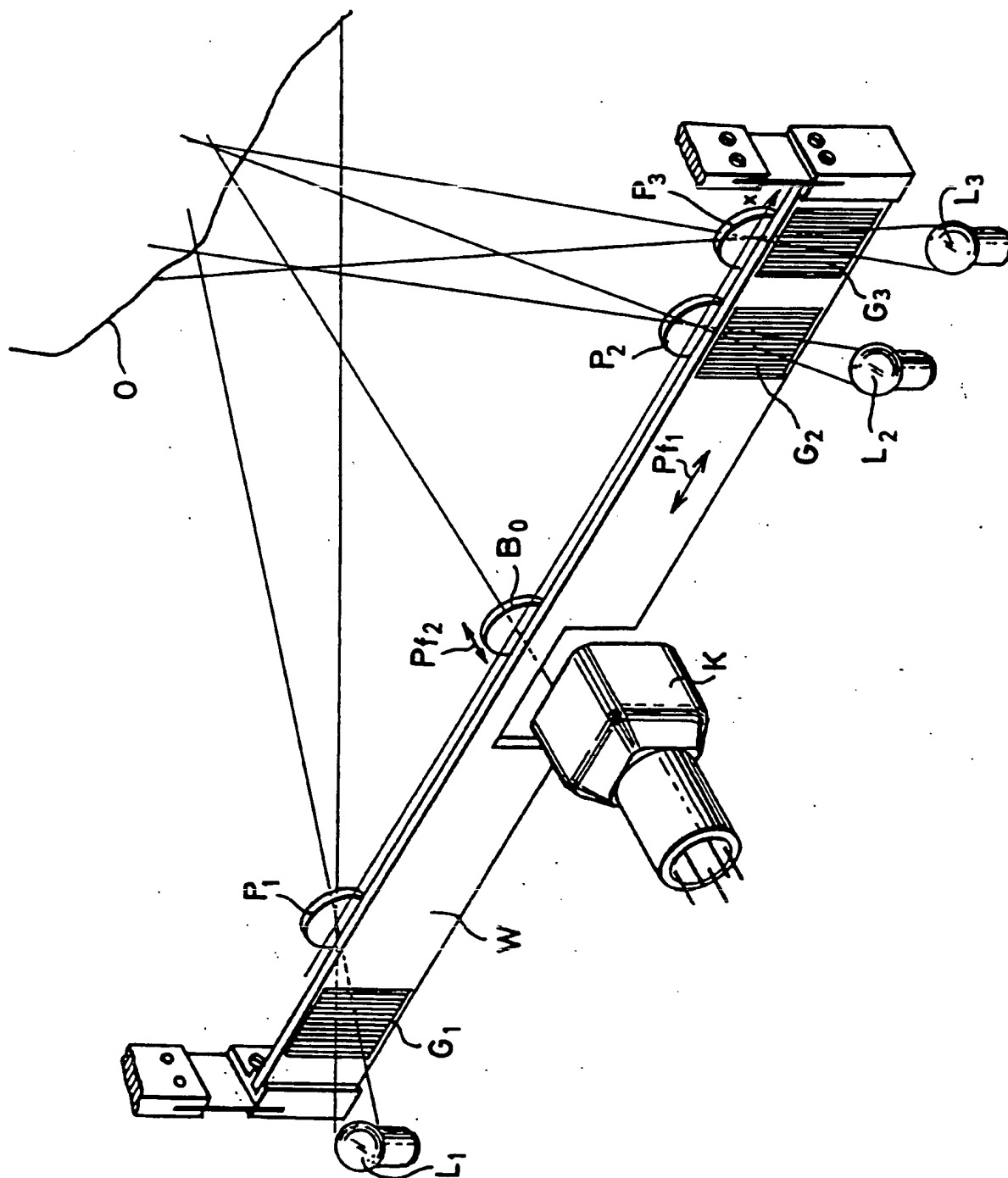


Fig. 1

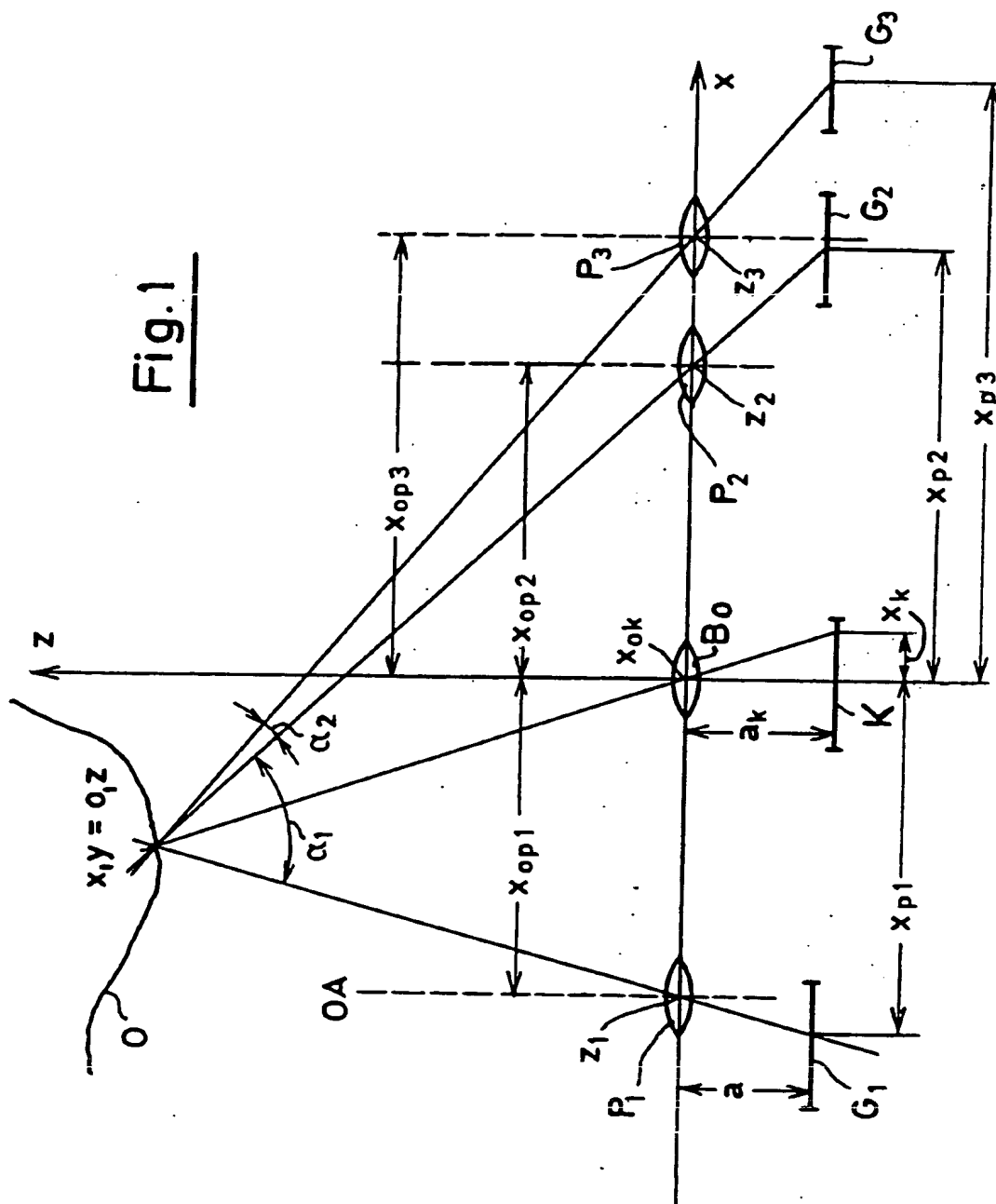


Fig.4

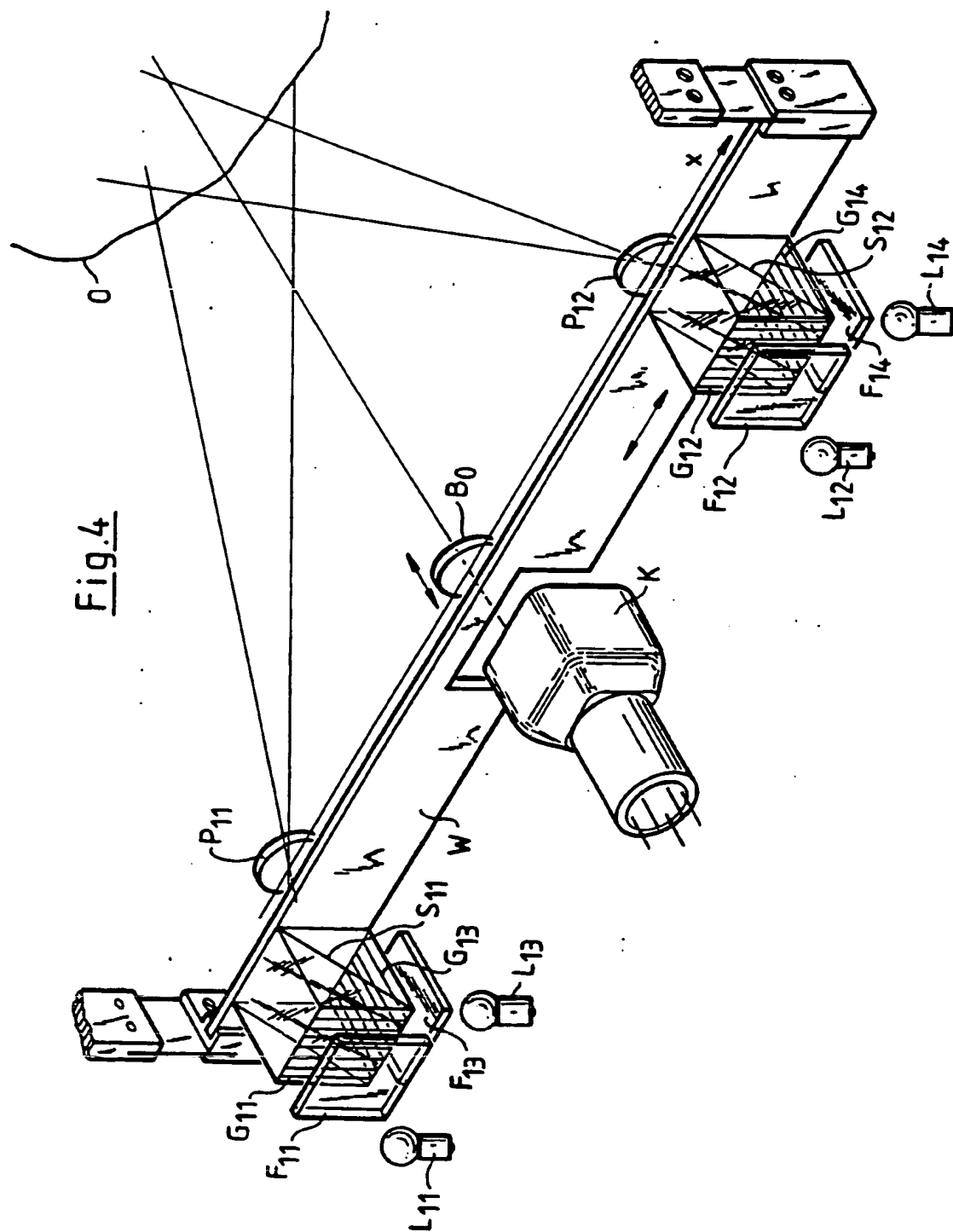


Fig. 5a

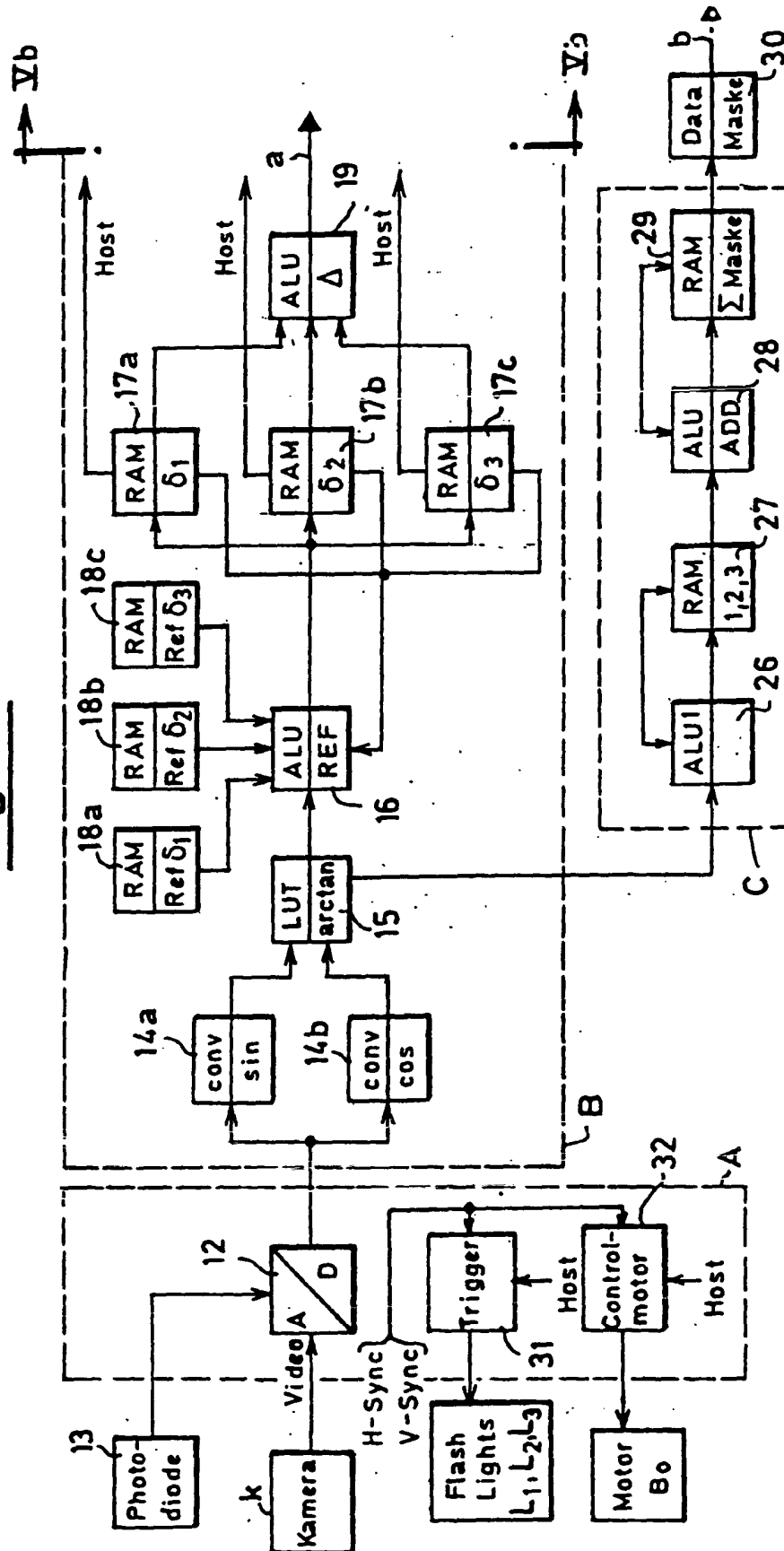


Fig. 5b

